

И. А. Кривошеев, Ю. А. Хохлова, Р. А. Завьялов

## РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ ЗАКРЫТЫЙ КОД

Рассматриваются вопросы многомерной оптимизации при проектировании авиационных двигателей и их узлов. Показана необходимость использования при этом различных, разработанных в разных КБ, программных комплексов. Приведены результаты создания и использования при решении таких задач разработанного авторами универсального программного комплекса-оптимизатора. *Авиационные двигатели; оптимизация; турбина ГТД; оптимизация параметров ГТД*

### ВВЕДЕНИЕ

С ростом стоимости современного натурального и полунатурного эксперимента возрастает потребность в математическом моделировании рассматриваемых физических процессов. Одновременно с этим развивается и вычислительная техника; современный настольный компьютер на несколько порядков мощнее, чем ЭВМ на заре развития, когда они занимали целое крыло здания. А если обратить внимание на кластеры, состоящие из тысяч ядер, то это несравненно более мощный инструмент для расчетно-теоретических исследований. При такой эволюции вычислительной техники значительно совершенствовались и сами методы решения математических задач, и способы представления результатов. В настоящее время расчетно-теоретические исследования фактически становятся базой для экспериментов во многих областях науки и позволяют существенно снизить сроки и стоимость создания новой техники.

### ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГТД

На рис. 1 приведены примеры многокритериальной оптимизации геометрии элементов проточной части и конструкции авиационных двигателей. При решении таких задач многомерная (векторная) функция цели на уровне двигателя обычно включает массу, габаритные диаметр и длину, расход топлива, тягу, а для

узлов соответственно также массу, габаритные диаметр и длину, КПД при ограничениях по мощности, частоте вращения и т. д. На практике постановка задачи может быть различной, например, задаются ограничения по внешним обводам узла и т. д. На уровне лопаточных венцов и других элементов учитываются специфические для них ограничения (условия размещения лопаток, прочности, газодинамической устойчивости и пр.).

В промышленности зачастую возникают задачи, когда требуется использовать ранее созданные программы с уже созданным интерфейсом (в виде входных и выходных файлов), которые представляют из себя так называемый «черный ящик» – эти программы имеют закрытые алгоритмы.

Известны такие программные комплексы, как IOSO NM, предназначенные для повышения эффективности сложных технических систем на основе многокритериальной и многопараметрической оптимизации проектных параметров. Как правило, такие программные комплексы используют закрытые алгоритмы оптимизации и на нашем рынке имеют относительно высокую стоимость использования. Программная среда SAMSTO и ряд приложений на ее основе, таких как DVIG, KAMERA, KOMPRESSOR, используют так называемые «неформальные» алгоритмы оптимизации, которые представляют собой табулирование параметров на входе по заданному закону с поддержанием в установленном диапазоне значений контролируемых параметров на выходе.

Контактная информация: 8(347)273-06-35

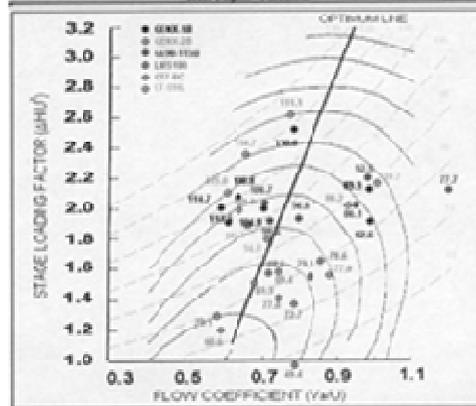
Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы»

### Оптимизация турбины для перспективного двигателя



| Узел               | Масса Узл |           |           |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
|                    | Вариант 3 | Вариант 2 | Вариант 1 |
| ПК                 | + 20      | -3        |           |
| ТНД                | -49       | -70       |           |
| Спора              | + 4       | -7        |           |
| ?                  | -25       | -80       |           |
| Вращательный ротор | -80       | 0         |           |
| ТТ                 | -120      | -100      |           |
| ?                  | -196      | -180      |           |

Оптимизация турбины по термодинамическим и кинематическим параметрам  
South Western, Delft/Leiden



Варианты проточных частей турбин

### Оптимизация узла в составе двигателей GP

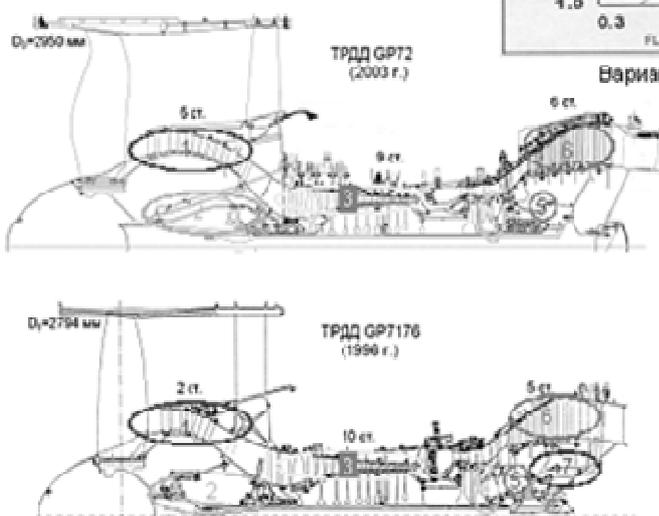


Рис. 1. Примеры многокритериальной оптимизации геометрии элементов проточной части, параметров и конструкции авиационных двигателей

Целью данной работы является разработка программного обеспечения, которое бы имело современный интерфейс, способный передать все возможности современных широкоформатных мониторов – это даст возможность пользователям работать с оптимизацией расчетов эргономично и как можно более интуитивно, что позволит сократить временные затраты на освоение программного комплекса.

Разрабатываемый программный комплекс базируется на следующих основных принципах:

- высокая эффективность решения для сложных многопараметрических задач, которая позволит существенно сократить сроки их решения;
- простота использования процедур оптимизации. Она достигается реализацией адаптивных алгоритмов, не требующих предварительных настроек и задания параметров, что позволит их использовать специалистам, не владеющим специальными знаниями в теории оптимизации.

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «ЧЕРНЫХ ЯЩИКОВ»

Как правило, в ходе большинства научных исследований приходится сталкиваться с тем или иным видом экспериментов, он может проводиться на производстве, в лабораториях, на опытных участках и т. д. Эксперимент по своей сути может быть как физическим, так и модельным, либо психологическим (но в данном исследовании этот вид эксперимента не рассматривается). Его можно провести на объекте, либо на модели этого объекта (модель обычно отличается от объекта масштабом, а иногда природой). При этом главное требование к модели – достаточно точное описание объекта.

В последнее время наряду с физическими моделями широкое распространение получили абстрактные математические модели. Данная работа посвящена разработке и исследованию математических моделей объекта исследования, в частности двигателя и его узлов.

Приоритетное внимание уделяется поиску оптимальных условий. Такая цель является одной из наиболее распространенных научно-технических задач. Подобные задачи возникают в тот момент, когда установлена возможность проведения процесса и необходимо найти наилучшие (оптимальные) условия его реализации. В широком смысле подобные задачи носят название задач оптимизации, а процесс их решения – процесс оптимизации (или просто оптимизация). Примерами задач оптимизации могут служить следующие примеры – выбор оптимального состава многокомпонентных смесей и сплавов, повышение производительности действующих установок, повышение качества продукции, снижение затрат на ее получение и т. п.

Многообразие условий применения авиационных ГТД в силовых установках летательных аппаратов и многочисленность показателей качества двигательных установок крайне усложняет задачу выбора оптимальных параметров рабочего процесса авиационного двигателя. При выборе параметров рабочего процесса конструктору необходимо одновременно удовлетворить большое количество требований, как правило, противоречивых с позиции их возможной реализации.

Рассмотрим обычную схему – «черный ящик», служащую для описания объекта исследования, приведенную на рис. 2. Справа изображены стрелки, обозначающие численные

характеристики целей исследования, любые из этих характеристик могут использоваться в качестве параметров оптимизации (в зависимости от целей поставленной задачи). Параметры оптимизации в литературе зачастую называют также критериями оптимизации, целевой функцией, выходом «черного ящика» и т. д. [2].

Соответственно, для проведения исследований и экспериментов необходимо иметь возможность воздействовать на результаты «черного ящика». Способы такого воздействия называют факторами оптимизации (или входами «черного ящика»), они условно изображены стрелками слева на рис. 2.

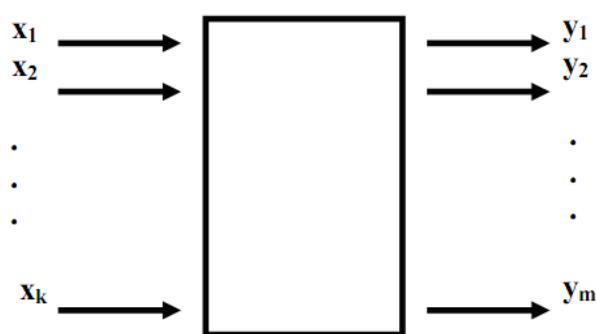


Рис. 2. Общая схема «черного ящика»

При решении любой оптимизационной задачи используются математические модели исследования, при этом под математической моделью понимается уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами на него воздействующими. В общем виде это уравнение можно представить как:

$$\varphi = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n),$$

где  $\varphi(x_1)$  – функция отклика.

При разработке программного обеспечения используется принцип воздействия на «черный ящик»: при закрытых алгоритмах работы того или иного приложения выявлять функции отклика для дальнейшего анализа.

## 3. ПАРАМЕТРЫ И КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрим подробнее вопрос о параметрах и критериях оптимизации и требованиях, предъявляемых к ним. Первоначально при изучении объекта исследования особое внимание уделяется этапу выбора параметров оптимизации и критериев оптимизации (функций цели), так как от правильности выбора параметра оптимизации, являющегося функцией цели, зависит правильность постановки задачи.

Критерий оптимизации является реакцией (откликом) на воздействие факторов, которые определяют поведение выбранной системы. Критерием оптимизации служит характеристика цели, заданная количественно.

Реальные объекты или процессы, как правило, очень сложны. Они часто требуют одновременного учета нескольких, иногда очень многих, параметров. Каждый объект может характеризоваться всей совокупностью параметров, или любым подмножеством этой совокупности, или одним-единственным параметром оптимизации. В последнем случае прочие характеристики процесса уже не выступают в качестве параметра оптимизации, а служат ограничениями.

На практике чаще приходится выполнять построение обобщенного параметра оптимизации как некоторой функции от множества исходных параметров.

Признак, по которому оптимизируется процесс, – это критерий оптимизации (или же целевая функция, построенная на обобщении исходных параметров оптимизации).

При выборе параметра оптимизации следует учитывать предъявляемые к ним требования.

Первое предъявляемое требование: критерий оптимизации должен быть количественным, задаваться числом. Множество значений, которые может принимать параметр оптимизации, называется областью его определения. Области определения могут быть непрерывными и дискретными, ограниченными и неограниченными.

Второе требование: критерий оптимизации должен выражаться одним числом. Зачастую это получается естественно, как регистрация показания прибора. Например, скорость движения машины определяется числом на спидометре. Часто приходится проводить некоторые вычисления. Один из возможных вариантов решения подобных задач состоит в том, чтобы выразить отношение одним числом и в качестве параметра оптимизации пользоваться значением отклонений (или квадратов отклонений) от этого числа.

Третье требование: однозначность в статистическом смысле. То есть заданному набору значений факторов должно соответствовать одно значение критерия оптимизации, при этом это требование необратимо: одному и тому же значению параметра могут соответствовать разные наборы значений факторов

Как наиболее важное выделяют четвертое требование к критериям оптимизации: его возможность действительно эффективной оценки

функционирования системы. Характер рассматриваемого объекта не остается постоянным в ходе исследования. Он изменяется по мере проведения экспериментов, накопления информации и в зависимости от достигнутых результатов. Это приводит к последовательному подходу при выборе параметра оптимизации. Так, например, на первых стадиях исследования технологических процессов в качестве параметра оптимизации часто используется выход продукта. Однако в дальнейшем, когда возможность повышения выхода продукта исчерпана, начинают интересоваться такими параметрами, как себестоимость, чистота продукта и т. д.

Эффективность функционирования системы можно оценивать как для всей системы в целом, так и оценивать эффективность ряда подсистем, входящих в состав данной системы. Но при этом всегда необходимо учитывать возможность того, что оптимальность каждой из подсистем по своему критерию оптимизации «не исключает возможность гибели системы в целом». Это означает, что попытка добиться оптимума с учетом некоторого локального или промежуточного параметра оптимизации может оказаться неэффективной или даже привести к браку.

Пятое требование к критерию оптимизации: требование универсальности и полноты. Под универсальностью параметра оптимизации понимают его способность всесторонне охарактеризовать объект. В частности, технологические параметры недостаточно универсальны: они не учитывают экономику. Универсальностью обладают, например, обобщенные параметры оптимизации, которые строятся как функции от нескольких частных параметров.

Шестым, не самым существенным требованием, предъявляемым к критерию оптимизации, является предпочтение того, чтобы параметр оптимизации имел физический смысл, был простым и легко вычисляемым.

Это требование предъявляется для удобства последующей интерпретации результатов эксперимента.

#### 4. ФАКТОРЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Следующим шагом решения оптимизационной задачи после выбора объекта исследования и параметра оптимизации является рассмотрение факторов, которые могут повлиять на процесс. Под фактором понимается измеряемая переменная величина, принимающая в некоторый момент времени определенное значение и влияющая на объект исследования.

Так, если какой-либо существенный фактор окажется неучтенным, и в ходе эксперимента будет принимать произвольные значения, не контролируемые экспериментатором, то это значительно увеличит ошибку опыта. Но, при поддержании этого фактора на определенном уровне может быть также получено ошибочное представление об оптимуме, потому что в этом случае нет оснований полагать, что полученный уровень является оптимальным.

В связи с вышеизложенным ясно, что выбор факторов является весьма существенным, так как от этого зависит успех оптимизации.

Факторы должны иметь область определения, внутри которой задаются его конкретные значения. Область определения может быть непрерывной или дискретной. В практических задачах области определения факторов имеют ограничения, которые носят либо принципиальный, либо технический характер.

Факторы разделяются на количественные и качественные. К количественным относятся те факторы, которые можно измерять, взвешивать и т. д. Качественные факторы – это различные вещества, технологические способы, приборы, исполнители и т. п.

Выбор факторов оптимизации следует осуществлять согласно предъявляемым к ним требованиям.

Первое требование заключается в том, что факторы должны быть управляемыми, это означает, что выбранное необходимое значение фактора возможно поддерживать постоянным в течение всего исследовательского опыта. Планировать эксперимент можно только в том случае, если уровни факторов подчиняются воле экспериментатора.

Например, экспериментальная установка смонтирована на открытой площадке. Здесь температурой воздуха мы не можем управлять, ее можно только контролировать, и потому при выполнении опытов температуру, как фактор, мы не можем учитывать.

Вторым предъявляемым требованием является требование однозначности факторов. Как правило, возникают затруднения при управлении факторами, которые являются функциями других факторов.

Необходимость введения сложных факторов возникает при желании представить динамические особенности объекта в статической форме. Например, требуется найти оптимальный режим подъема температуры в реакторе. Если относительно температуры известно, что она должна нарастать линейно, то в качестве фактора вме-

сто функции (в данном случае линейной) можно использовать тангенс угла наклона, т. е. градиент.

В ходе научных исследований, как правило, приходится иметь дело с одновременным изменением нескольких факторов, поэтому третье выдвигаемое требование – требование совместности факторов. Третье требование означает, что любые комбинации факторов осуществимы и безопасны. Возникающие трудности при несовместности обходят тем или иным путем, например, возможно разбиение области определения на подобласти и решение отдельных задач, либо возможно сокращение областей определения.

При этом необходима возможность установления фактора на любом уровне вне зависимости от уровней других факторов, то есть независимость факторов.

## 5. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Для решения задачи оптимизации предложено большое количество алгоритмов, базирующихся на различных принципах, но лишь немногие из них нашли широкое применение. Среди них нет еще ни одного алгоритма, полностью удовлетворяющего всем предъявляемым требованиям. По-прежнему остается актуальной задача разработки новых более эффективных алгоритмов с широкой областью применения.

Преимущества или недостатки того или иного алгоритма, определяющие его применимость, нельзя оценить однозначно. Сравнение всегда приходится вести по ряду показателей, но опыт работ показывает, что достаточно сложные задачи удается решать только одним из методов поиска, т. е. таким методом, при котором последовательно вычисляются значения функции цели и проверяются ограничения в различных точках области поиска. Различные алгоритмы этого типа, собственно говоря, и различаются способами выбора последовательности этих точек.

При оптимизации ГТД не встречаются задачи без ограничений. Они, как правило, бывают нелинейными. Функция цели часто многоэкстремальная, поэтому преимущественно применяются методы глобального поиска, но возможно и применение локальных методов при достаточно большой области притяжения глобального экстремума. В этом случае приходится для повышения надежности повторять поиск из нескольких начальных точек.

Большинство методов поиска, применяемых при оптимизации сложных изделий, относится

к трем четко разграниченным группам [1]. Первые две из них включают детерминированные методы.

Градиентные методы в широком смысле этого слова. В классификациях они часто называются «методами, использующими производные».

Безградиентные методы, т. е. методы, в которых выбор очередной точки в области поиска (очередной шаг) строго предопределен сложившейся ситуацией (как и в градиентных методах), но производные не вычисляются и не используются.

Статистические методы или методы случайного поиска. Это все рандомизированные методы, т. е. методы, в которых каждый очередной шаг или большинство шагов формируется с использованием случайных или псевдослучайных чисел.

Методы первой группы наиболее чувствительны к виду функции цели и области поиска. При их использовании большое число шагов тратится на вычисление производных. Методы этой группы поэтому малоприменимы для сложных задач оптимизации, но они очень эффективны в тестовых задачах, в особенности, если удастся вывести и использовать формулы для вычисления производных. В реальных задачах получение таких формул, как правило, невозможно или очень затруднено.

Из методов второй группы простейшим является метод сканирования, т. е. последовательного перебора точек в области поиска с заранее заданным шагом и порядком перебора. Он является очень надежным и, несмотря на чрезвычайно низкую экономичность, иногда применяется при быстровычисляемых математических моделях и небольшой области поиска. Более экономичным является симплексный метод, в особенности его модификации, использующие регулярные, а чаще нерегулярные симплексы. Эти методы довольно надежны. Но они имеют существенный недостаток. При большом числе переменных значительная часть оперативной памяти расходуется на хранение громоздкой матрицы, описывающей симплекс. Кроме того, в области оптимума много шагов тратится на принятие решения о прекращении поиска. Эти методы наиболее целесообразны при умеренном числе переменных и невысоких требованиях к точности решения. Из более сложных методов стоит упомянуть метод вращающихся координат (метод Розенброка), метод Пауэлла, метод Буцци Феррариса, ЛП-поиск и др. Эти алгоритмы можно рекомендовать для оптимизации

при не очень сложном характере функции цели и области поиска, так как в противном случае они иногда попадают в «ловушки» и поиск заканчивается преждевременно.

Третья группа методов является наиболее многочисленной и разнообразной. В ней имеются алгоритмы более простые, чем в первых двух группах, и значительно более сложные. Они резко отличаются по эффективности, и это вызывает многочисленные споры по их применимости. Математики относятся к ним с пренебрежением, например, Д. Химмельблау прямо указывает, что «методы случайного поиска наименее изящны и эффективны». Но, тем не менее, наиболее сложные задачи оптимизации были решены именно методами случайного поиска. Простейшим из алгоритмов является метод «слепого поиска», при котором поочередно вычисляются значения функции цели в случайных точках области поиска и выбираются наилучшие из них. Этот метод лучше сканирования, но эффективность его остается очень низкой. Несмотря на это он иногда применяется. Наиболее совершенные из этих методов можно рекомендовать для самых сложных задач оптимизации.

## 6. ПРИКЛАДНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В настоящее время промышленные предприятия имеют в своем арсенале достаточно большое количество программных средств, представляющих собой DOS-приложения, с консольным управлением, что делает работу с ними достаточно сложной для рядового пользователя. Однако отказаться от них нет возможности, так как они используют уникальные методы расчета, воспроизведение которых потребует больших временных затрат и других издержек.

Таким образом, использование программ-оптимизаторов даст «вторую жизнь» устаревшим DOS-приложениям, которые станут играть роль решателей.

В разработке настоящего программного обеспечения сделан акцент на унификацию его применения. Предполагается объектно-ориентированный интерфейс для оперирования параметрами оптимизации – такое представление будет более интуитивным для пользователя. И позволит работать с подавляющим большинством DOS-приложений без привлечения сторонних специалистов для адаптации программного комплекса по оптимизации к тому или иному решателю.

Блок-схема работы разрабатываемого программного комплекса показана на рис. 3. Для некоторой модели, заданной «черным ящиком» в виде исполняемого файла М.exe, факторы  $X$  задаются файлом входных данных (пример импорта исходных данных и выбор табулируемых параметров приведен на рис. 4), а результаты расчета записываются в файл  $Y$  (пример приведен на рис. 5). Поиск оптимума представляет собой «оптимальное управление», когда внешняя программа (назовем ее «оптимизатор») заставляет модель  $M$  двигаться из исходного состояния  $X_0(X_{10}, X_{20}, \dots, X_{k0})$  в конечное  $X_n(X_{1n}, X_{2n}, \dots, X_{kn})$ , функция цели при этом имеет вид:

$$Z = \sum b_i \left( \frac{Y_i}{Y_{i0}} \right)^{n_i} \rightarrow \min,$$

где  $Y_{i0}$  – начальное значение некоторого выходного параметра,  $b_i$  – весовые коэффициенты выходных параметров, причем  $b_i > 0$ , если  $Y_i$  минимизируемый параметр;  $b_i < 0$ , если  $Y_i$  максимизируемый параметр,

$$n_i = \begin{cases} 1, & \text{если } b_i > 0; \\ -1, & \text{если } b_i < 0, \end{cases}$$

$i$  – номер итерации.

На рис. 6 показана таблица зависимостей параметра оптимизации от варьируемых факторов, задаваемых пользователем.

В основе работы программы заложена математическая модель оптимизации, основной задачей которой является сокращение количества запусков решателя [3]. Это позволит значительно ускорить процесс оптимизации, сократить временные затраты на получение требуемого результата и снизить аппаратные требования к рабочей станции.

При выборе факторов следует ориентироваться на требования, изложенные выше. Фактор считается заданным, если указаны его название и область определения. В выбранной области определения он может иметь несколько значений, которые соответствуют числу его различных состояний. Выбранные для эксперимента количественные или качественные состояния фактора носят название уровней фактора. Значения факторов, соответствующие определенным уровням их варьирования, выражают в кодированных величинах. Под интервалом варьирования фактора подразумевается разность между двумя его значениями, принятая за единицу при кодировании (т. е. шаг).

При этом следует учитывать, что чрезмерное увеличение величины интервалов варьиро-

вания нежелательно, так как это может привести к снижению эффективности поиска оптимума. А очень малый интервал варьирования уменьшает область эксперимента, что замедляет поиск оптимума.

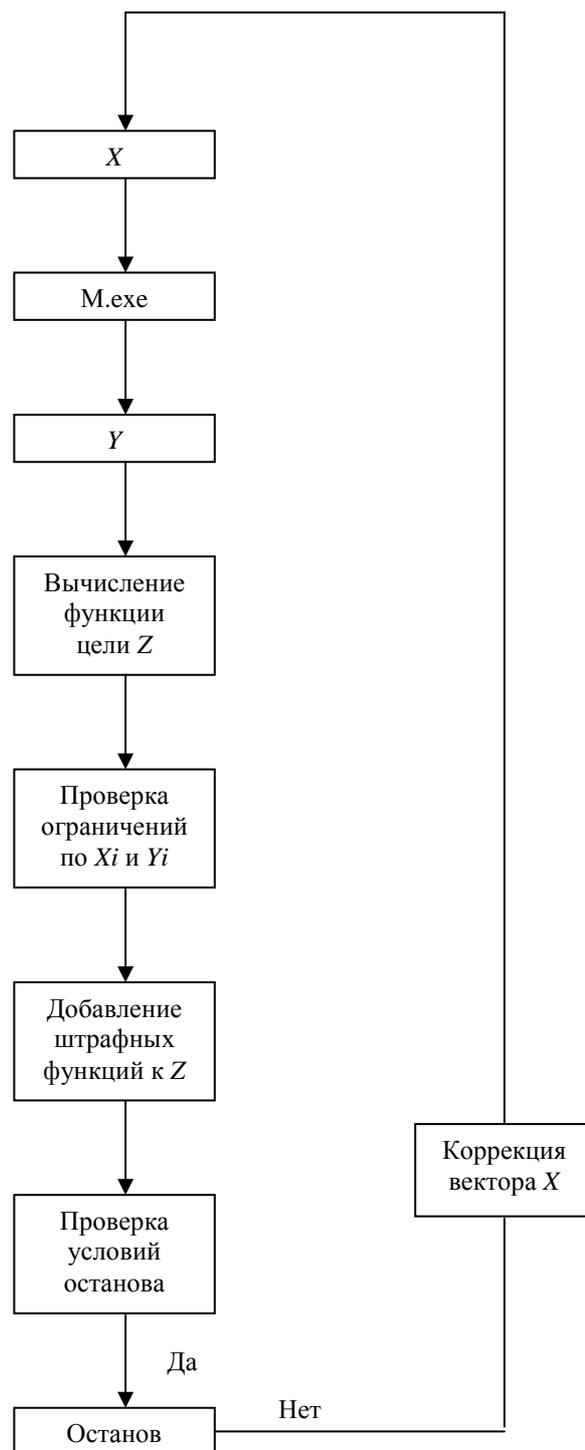


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оптимизации

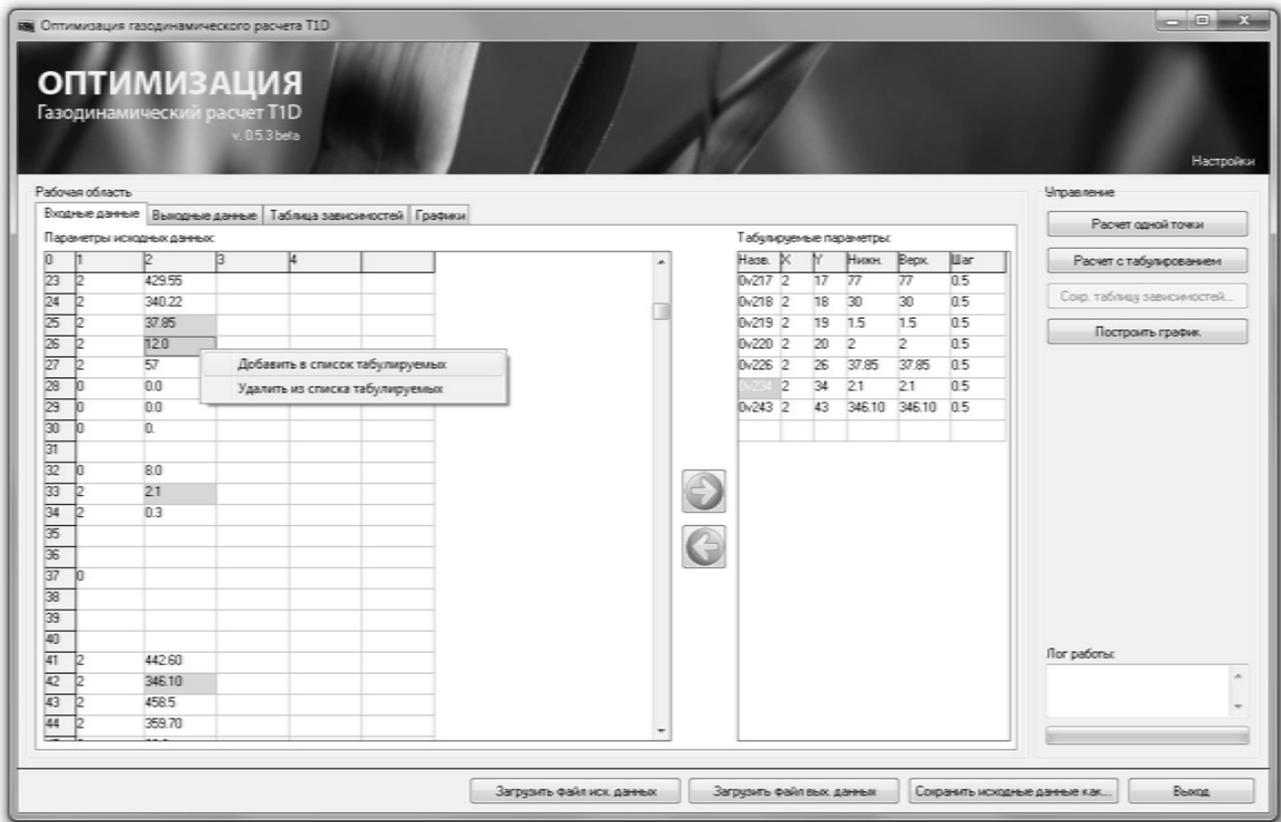


Рис. 4. Пример входных данных разработанного программного комплекса

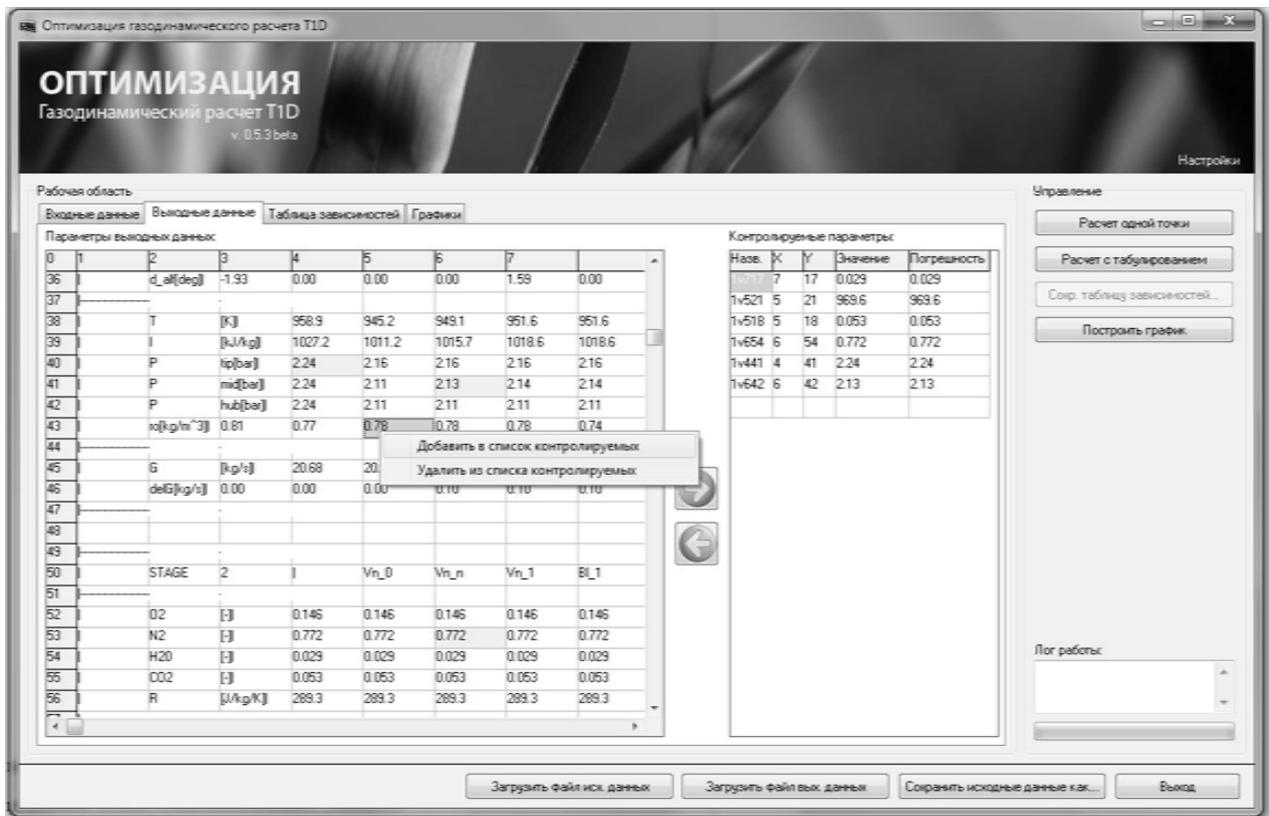


Рис. 5. Пример выходных данных разработанного программного комплекса

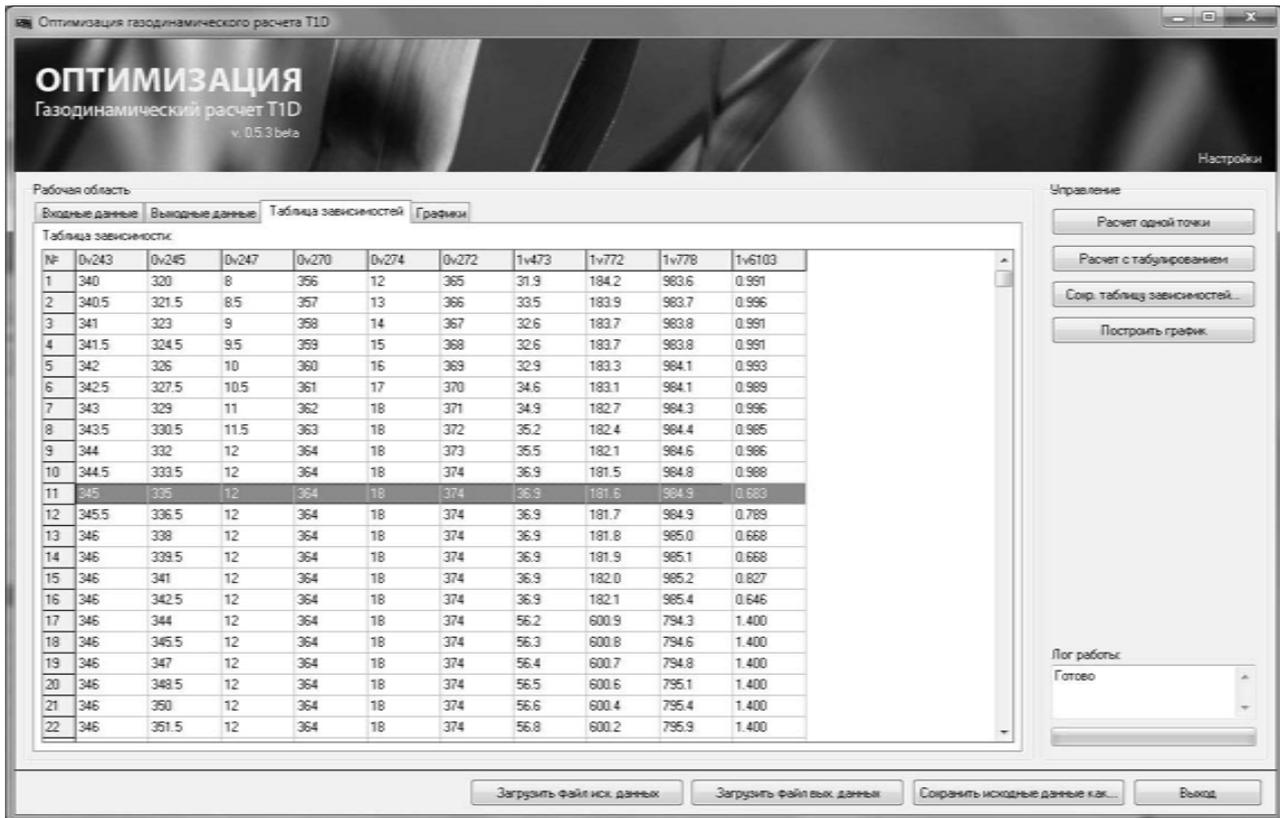


Рис. 6. Пример таблицы зависимостей табулируемых параметров

Рассмотрим пример проведения неформальной оптимизации по двум факторам с использованием разрабатываемого программного комплекса [4]. Т. е. при табулировании  $X_i$  выявляем функцию цели  $Z(X_i)$   $\left. \begin{matrix} \text{прочие } X_j \\ \text{средние} \end{matrix} \right\}$  в виде:

$$Z = \frac{\prod Z_i(X_i) \Big|_{\substack{\text{все } X_j \\ \text{средние}}}}{Z_{\text{ср}}^{n-1} \Big|_{\substack{\text{все } X_i \\ \text{средние}}}}$$

Допустим, при имеющейся исходной проточной части турбины (рис. 7), требующей оптимизации для достижения максимума функции цели, задаем табулирование двух факторов. В результате имеем поверхность зависимости функции цели от воздействующих факторов (рис. 8).

Далее по полученной поверхности зависимости функции цели от воздействующих факторов происходит поиск максимума функции цели с использованием методов поиска, описанных выше.

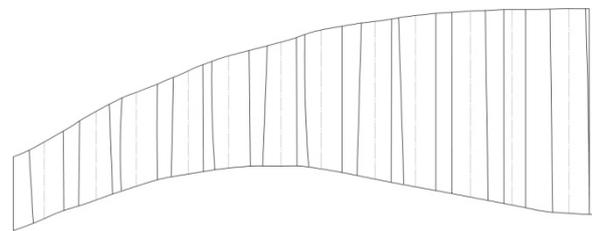


Рис. 7. Исходная проточная часть турбины (до оптимизации)

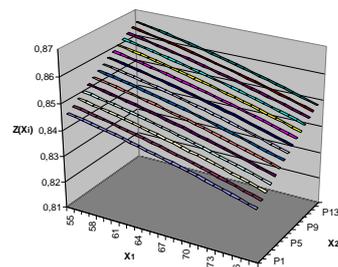
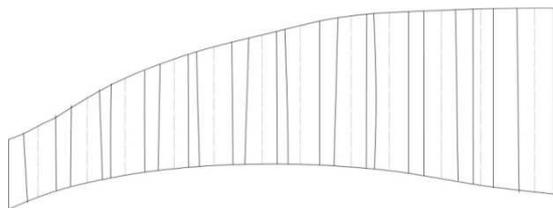


Рис. 8. Зависимость функции цели от воздействующих факторов

И в результате можем получить усовершенствованную проточную часть, перестроенную для оптимизированной функции цели (рис. 9).



**Рис. 9.** Проточная часть после проведения оптимизации

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрев существующие проблемы, возникающие при проведении расчетов на промышленных предприятиях, нельзя не отметить актуальность разработки проекта программного оптимизационного комплекса.

Наличие такого комплекса позволит не только найти наиболее оптимальное решение поставленной задачи, но и значительно сократить временные затраты на совершенствование современных изделий. Позволит решать все классы оптимизации, включая уникальные задачи многопараметрической (100 и более переменных), многокритериальной (более 10 критериев) оптимизации, что позволит значительно повысить эффективность объекта оптимизации и получать технические решения и законы управления, не имеющие аналогов. Связать и решать в едином проекте задачи, рассчитываемые различными программными средствами на различных ПК, объединенных в локальную сеть или через Интернет (многодисциплинарная оптимизация). Определить наиболее эффективные технические решения по многим критериям, включая многоцелевое оптимальное управление (многокритериальная постановка). Минимизировать необходимое число определений целевой функции (число вычислений по математической модели либо проведения экспериментов) при поиске оптимального технического решения. Определить максимально достижимую эффективность системы.

Технология оптимизации первоначально используется при поиске путей повышения эффективности силовых установок и их узлов современных и перспективных летательных аппаратов различного назначения путем решения задач оптимального проектирования и оптимального управления. Но нет принципиальных сложностей в применении этой технологии в экологии, биотехнике, экономике и т. п. при условии наличия соответствующих математических моделей и участия в проведении исследований специалистов из этих областей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедзянов Д. А., Кривошеев И. А., Тунаков А. П. САПР газотурбинных двигателей: учеб. пособие. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2005. 200 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., 1976. 279 с.
3. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
4. Налимов В. В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 208 с.

### ОБ АВТОРАХ

**Кривошеев Игорь Александрович**, декан факультета авиац. двигателей, проф. каф. авиац. двигателей. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УАИ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двигателям, электроракетн. двигателям и энергоустановкам летательн. аппаратов (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. автоматизированного проектирования авиац. двигателей.

**Хохлова Юлия Андреевна**, асп. той же каф. Дипл. инженер по авиац. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. проектирования лопаточных машин.

**Завьялов Роман Алексеевич**, асп. той же каф. Дипл. инженер по авиац. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. проектирования лопаточных машин.